

บทที่ 2

ทฤษฎี



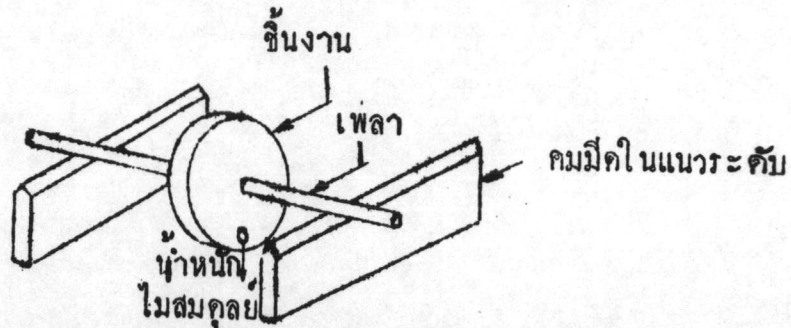
### สาเหตุที่ทำให้เกิดความไม่สมดุล

1. การไม่สมมาตร (assymetry) ของชิ้นงาน เช่น การกลาดเคลื่อนของ core ขณะหล่อ พื้นผิวชิ้นงานหยาบขณะ forging หรือรูปร่างของชิ้นงานไม่สมมาตร พยายาม ๆ ว่าเกิดจากความไม่สมบูรณ์ในขบวนการผลิต
2. ชิ้นงานนั้นไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เช่น การเกิดกากในโครงสร้างของเนื้อวัสดุ ซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นของเนื้อวัสดุไม่เท่ากันโดยตลอด
3. เกิด eccentricity ที่พื้นผิวสัมผัสของแบริ่ง เช่น inner race ของ ball bearing เกิด eccentric
4. เกิดการบิดเอียงขณะใช้งาน เช่น ใบพัดลมของพัดลมกรงกระรอกบิดไปขณะใช้งานเมื่อใบใดใบหนึ่งบิดไป จุดศูนย์กลางของพัดลมก็จะเปลี่ยนไป ทำให้เกิดการสั่น
5. เกิดการไม่อยู่ในแนวแกนของแบริ่ง
6. การโค้งงอ, บิดเอียงของเพลาชั่งใช้เป็นแกนหมุน
7. การกระจายของมวลไม่ดีพอ (poor distribution of mass)
8. ขนาดของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปขณะแก่งผิวงาน
9. อุณหภูมิซึ่งอาจจะทำให้โครงสร้างของชิ้นงานเปลี่ยนไป โดยจะทำให้ความเร็ววิกฤตเข้าใกล้ operating speed เช่น steam - turbine

### ชนิดของความไม่สมดุล

1. Static Unbalance เกิดจากจุดศูนย์กลางถ่วงของวัตถุเปลี่ยนไปจากแนว

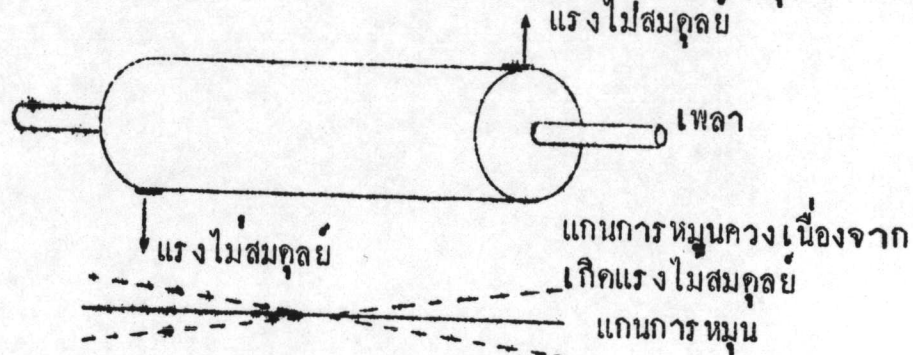
การหมุน



รูปที่ 2-1 การไม่สมคูลย์แบบสแตตคค

สมมุคควาคชิ้นงานอยู่ในสภาวะสมคูลย์แล้ว ถ้าเราใส่ น้ำหนักลง ณ ตำแหน่งหน่งของชิ้นงานนั้น เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกจะทาให้ส่วนของชิ้นงานที่มีน้ำหนักถ่วงอยู่อยู่ส่วนต่ำสุด เพราะฉะนั้น การตรวจสอบความไม่สมคูลย์นี้ไค้โดยการวางชิ้นงานนั้นบนคม่มีค 2 คม่ซึ่งอยู่ในระดั้มเดียวกัน

2. Pure Dynamic Unbalance เกิดจากน้ำหนักหรือแรงไม่สมคูลย์

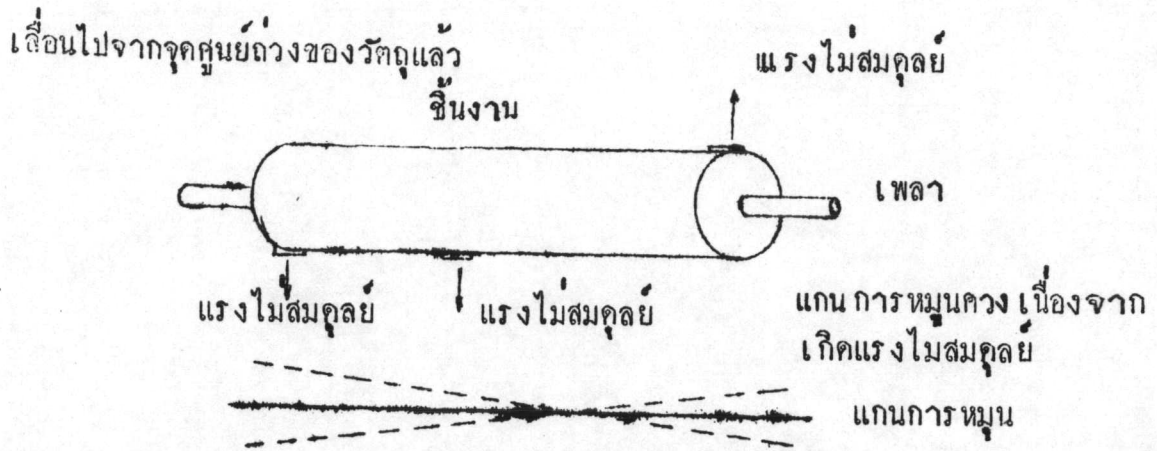


รูปที่ 2-2 การไม่สมคูลย์แบบเพียวไดนามคค

ซึ่งเกิดข้้นที่ปลายแต่ละข้างของชิ้นงาน โดยแรงไม่สมคูลย์นี้มีทิศทางตรงกันข้ามและขนาดเท่ากัน ลักษณะการไม่สมคูลย์ทาง dynamic เช่นนี้จะเกิดการสั่นค้งรูปเป็นรูปกรวย สองกรวย ซึ่งจะมีจุดยอดรวมกันที่จุดศูนย์กลางถ่วงของชิ้นงานนั้น จะเห็นไค้ว่าลักษณะเช่นนี้มีการสมคูลย์แบบ static แต่ไม่สมคูลย์แบบเพียวไดนามคค

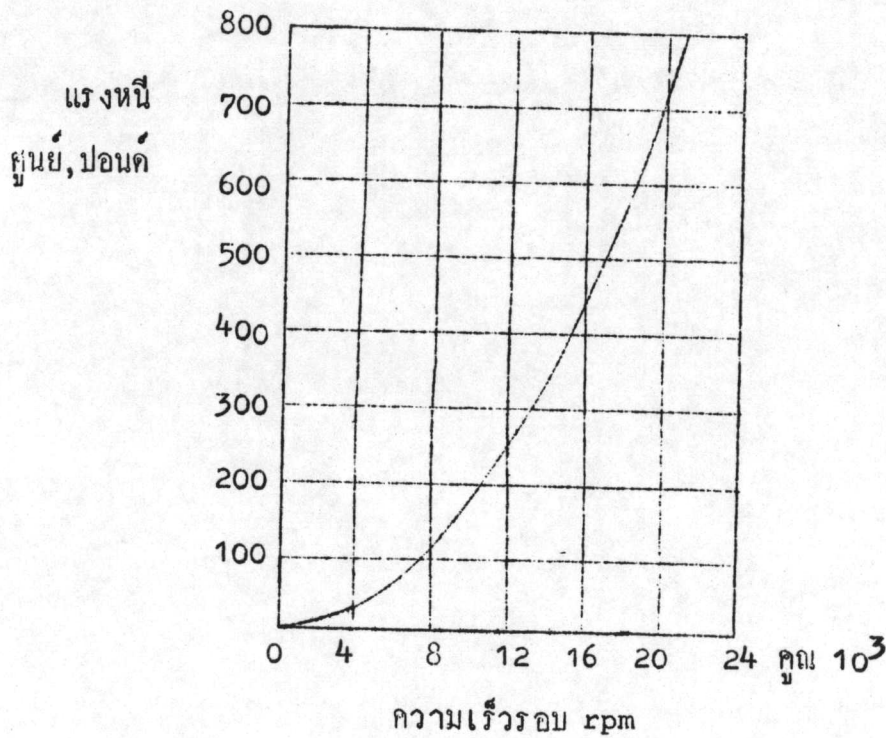
3. Static และ Dynamic Unbalance เกิดจากความไม่สมคูลย์อันเนื่อง

จาก static และ dynamic รวมกัน จะเห็นไค้ว่าจุดยอดของกรวยหน่งสอง ไค้



รูปที่ 2-3 การไม่สมดุลแบบสแตติกและไดนามิครวมกัน

ผลของจำนวนความไม่สมดุลน้อย ๆ ที่ความเร็วรอบสูง



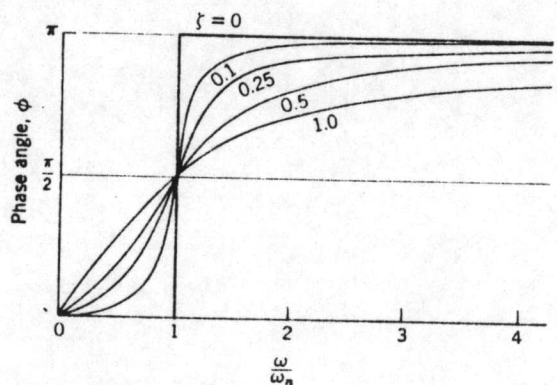
รูปที่ 2-4

แสดงผลของแรงหนีศูนย์ที่ความเร็วรอบต่างๆของ 1 in-ounce unbalance

รูปที่ 2-4 เป็นกราฟแสดงแรงหนีศูนย์ที่เกิดจากความไม่สมดุล 1 นิ้ว-ออนซ์ ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ (1 นิ้ว-ออนซ์ เท่ากับน้ำหนักของความไม่สมดุล 1 ออนซ์ เกิดขึ้นที่ระยะทาง 1 นิ้ว

ห่างจากแกนของการหมุน) จะเห็นว่แรงหนีศูนย์กลางเนื่องจากแรงไม่สมดุลย์ 1 นิ้ว-ออนซ์ที่  
 ความเร็วรอบ 1000 rpm = 1.76 ปอนด์ แต่ถ้าที่ความเร็วรอบ 10000 rpm แรงหนีศูนย์กลาง  
 จะเปลี่ยนเป็น 176 ปอนด์ แรงหนีศูนย์กลางเปลี่ยนตามกำลังสองของความเร็วรอบ ในกรณีนี้  
 ชิ้นงานใหญ่มากแรงหนีศูนย์กลางก็จะมีมากตามด้วย ถึงแม้ว่าจุดศูนย์กลางของชิ้นงานจะเคลื่อนจาก  
 แกนการหมุนไปเพียงเล็กน้อยก็ตาม เช่น พิจารณา rotor ของ aircraft gas  
 turbine หนัก 400 ปอนด์ หมุน 16,000 rpm จุดศูนย์กลางห่างจากแกนหมุน  
 0.001 นิ้วจะเกิดความไม่สมดุลย์  $400 \times 16 \times 0.001$  นิ้ว-ออนซ์ = 6.4 นิ้ว-ออนซ์ และ  
 จะเกิดแรงหนีศูนย์กลาง  $F = MR\omega^2 = \frac{400}{32.2} \times \frac{0.001}{12} \left( \frac{2\pi \times 16000}{60} \right)^2 = 2900$  ปอนด์ แรงที่เกิด  
 ขึ้นนี้จะทำให้ชิ้นส่วนนั้นพังได้ขณะใช้งาน ในขบวนการผลิตมันเป็นไปไม่ได้ที่จะผลิตให้ชิ้นงาน  
 นี้มีจุดศูนย์กลางต่ำกว่า 0.001 นิ้ว ห่างจากแกนการหมุน เพราะฉะนั้น เราจึงต้องทำการ  
 ตรวจสอบสมดุลย์ภายหลังจากที่ชิ้นงานได้ผลิตออกมาแล้ว โดยการสมดุลย์ในเครื่องตรวจสอบ  
 ความสมดุลย์ วัดหาตำแหน่ง และขนาดของน้ำหนักที่จะถ่วง เพื่อให้ชิ้นงานนั้นอยู่ในสภาพ  
 สมดุลย์

ความสัมพันธ์ระหว่างจุดสองกับจุดหนัก



รูปที่ 2-5 แสดงมุมล่าหลังที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

จุดสองคือจุดบนวัตถุหมุนซึ่งเหวี่ยงออกมาอันเนื่องมาจากแรงไม่สมดุลย์ในแต่ละรอบ  
 ของการหมุน โดยมองเห็นเป็นตัว เลขหรือเครื่องหมายสัญลักษณ์บนวัตถุหมุนหรือ dial  
 protactor ใด ๆ จากการใช้สโครโบสโคปส่อง จุดสองนี้ไม่จำเป็นต้องอยู่จุดเดียว

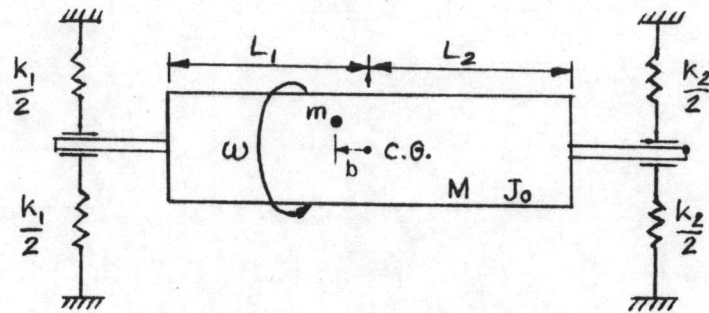
กันกับจุดหนัก แคมมันจะเป็นจุดซึ่งจะบอกหรือแนะแนวทางที่จะทราบน้ำหนักถ่วง (balance weight) สำหรับที่ความเร็วรอบต่ำ การสั่นอยู่ในเฟสเดียวกันกับการหมุน (rotary motion) เพราะฉะนั้น จุดสองกับจุดหนักก็จะเป็นจุดเดียวกัน ดังนั้น น้ำหนักถ่วงก็ถ่วงที่ตำแหน่งตรงกันข้ามกับจุดสองนั้น แต่ถ้าความเร็วรอบเพิ่มขึ้น การสั่นเริ่ม lag กับความเร็วของการหมุน (rotary motion) ดังนั้นจุดทั้งสองจึงไม่ได้อยู่ที่จุดเดียวกันมุมหรือการเปลี่ยนไประหว่างจุดสองกับจุดหนักเรียกว่า "มุมแห่งการล่าหลัง" มุมนี้จะอยู่ระหว่าง  $0-180^\circ$  ขึ้นอยู่กับเครื่องและความเร็วรอบที่หมุน

กราฟข้างบนแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบหน่วยเป็น rpm กับมุมแห่งการล่าหลัง ณ จุดต่ำกว่าความเร็ววิกฤต มุมล่าหลังจะต่ำกว่า  $90^\circ$  สูงกว่าความเร็ววิกฤต มุมล่าหลังจะอยู่ระหว่าง  $90^\circ - 180^\circ$

#### การพิจารณาจำนวนระนาบแก้ไขในการตรวจสอบสมดุล

จำนวนระนาบแก้ไขที่ใช้ในการตรวจสอบสมดุลขึ้นอยู่กับรูปร่างของชิ้นงานที่จะนำมาตรวจสอบ แต่จะต้องมีระนาบแก้ไขอย่างน้อยพอและให้ความแน่นอนได้ตามที่ต้องการสำหรับการตรวจสอบสมดุล เช่น ชิ้นงานที่มีรูปร่างเป็นแผ่นจานบาง การใช้ระนาบแก้ไขเพียงระนาบเดียวก็เพียงพอ ซึ่งระนาบแก้ไขก็อยู่ที่ใกล้ระนาบซึ่งผ่านจุดศูนย์กลางของวัตถุมาก ถึงแม้จะใช้ระนาบแก้ไขสองระนาบก็ไม่มี ความหมาย เพราะระนาบแก้ไขสองจะชิดกันมาก อีกอย่างโมเมนต์ของความไม่สมดุลอื่นเนื่องจากผลทางไคนามิกมีค่าน้อยมาก สำหรับชิ้นงานที่มีความยาวตามแนวแกนมาก เมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางหรือชิ้นงานที่หมุนที่ความเร็วรอบสูง ๆ ก็จะต้องมีระนาบแก้ไขมากกว่าหนึ่งระนาบขึ้นไป ถ้าชิ้นงานนั้นมีความแข็งแรงทุกขณะเมื่อมันหมุนหรือใช้งานอยู่ การใช้ระนาบแก้ไขเพียงสองระนาบก็จะเป็นการเพียงพอ เพราะสามารถทำการตรวจสอบสมดุลได้อย่างสมบูรณ์แล้ว การใช้ระนาบแก้ไขมากกว่านี้ก็จะเป็นการสิ้นเปลืองเวลาโดยใช้เหตุ ชิ้นงานบางอย่างที่หมุนที่ความเร็วเกินความเร็ววิกฤตก็อาจจะต้องใช้ระนาบแก้ไขตั้งแต่สามระนาบขึ้นไป

### การสั่นอันเนื่องมาจากแรงไม่สมดุล



เครื่องตรวจสอบสมดุลที่สร้างขึ้นในการวิจัยครั้งนี้ มีลักษณะโมเดลดังรูปข้างบน การวัดขนาดของการสั่นที่วัดที่แบริ่งทั้งด้านซ้ายและขวา และจากการวิเคราะห์การสั่นในภาคผนวก ข ได้ค่าขนาดของการสั่นที่เกิดที่แบริ่งทั้งสองคือ

$$X_1 = \frac{mrw^2 b(k_1 L_1 - k_2 L_2) - mrw^2(k_1 L_1^2 + k_2 L_2^2 - J_o \omega^2)}{(k_1 + k_2 - M\omega^2)(k_1 L_1^2 + k_2 L_2^2 - J_o \omega^2) - (k_1 L_1 - k_2 L_2)^2} \sin \omega t - L_1 \theta$$

$$X_2 = \frac{mrw^2 b(k_1 L_1 - k_2 L_2) - mrw^2(k_1 L_1^2 + k_2 L_2^2 - J_o \omega^2)}{(k_1 + k_2 - M\omega^2)(k_1 L_1^2 + k_2 L_2^2 - J_o \omega^2) - (k_1 L_1 - k_2 L_2)^2} \sin \omega t + L_2 \theta$$

$$\theta = \frac{mrw^2 b(k_1 + k_2 - M\omega^2) - mrw^2(k_1 L_1 - k_2 L_2)}{(k_1 + k_2 - M\omega^2)(k_1 L_1^2 + k_2 L_2^2 - J_o \omega^2) - (k_1 L_1 - k_2 L_2)^2} \sin \omega t$$